

من الخلايا الشمسية إلى الأنظمة الكهروضوئية

لعرج مراد ومامة بوشعور

قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة تلمسان

وحدة البحث "المواد والطاقات المتجددة" (URMER)، تلمسان

la_merad@yahoo.fr ; bouchaour.m@gmail.com

الخلايا الشمسية هي الوحدة الأساسية لتحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء، حيث تعتمد على مواد شبه موصلة لتحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية عبر التأثير الكهروضوئي. من ناحية أخرى، الكهروضوئية (PV Systems) هي تطبيق عملي يجمع بين عدة خلايا شمسية لتكوين ألواح شمسية تعمل مع مكونات أخرى، مثل المحولات (Inverters)، ووحدات التحكم في الشحن، وبطاريات التخزين، لتكوين نظام متكامل قادر على تزويد المباني أو الشبكات بالطاقة الكهربائية.

1. مقدمة

إن مراحل تطور الخلايا الشمسية تشمل تطورات تقنية متعددة عبر الزمن، حيث شهدت تحسناً كبيراً في الكفاءة والموثوقية والتكلفة. فيما يلي ملخص للمراحل الرئيسية في تطور الخلايا الشمسية [6].

1.1. الاكتشافات المبكرة (القرن التاسع عشر)

- 1839 اكتشاف الأثر الكهروضوئي : اكتشف الفيزيائي الفرنسي إدموند بيكريل (Edmond Becquerel) تأثير تحويل الضوء إلى كهرباء في مواد معينة.
- 1873 اكتشاف حساسية السيلينيوم للضوء : اكتشف ويلوبى سميث (Willoughbi Smith) أن السيلينيوم يصبح موصلًا للكهرباء عند تعرضه للضوء.
- 1883 أول خلية شمسية سيلينية : قام تشارلز فريتس (Charles Fritts) بتطوير أول خلية شمسية مصنوعة من السيلينيوم، لكنها كانت ذات مردود منخفض للغاية.

2.1. التطورات في القرن العشرين

- 1905 تفسير الأثر الكهروضوئي : نشر ألبرت أينشتاين (Albert Einstein) ورقته حول التأثير الكهروضوئي، والتي أسست لفهم كيفية تحول الضوء إلى كهرباء. لاحقاً، حصل على جائزة نوبل في الفيزياء نتيجة لهذا العمل [2].

- 1954 أول خلية شمسية من السيليكون : طورت مختبرات بال (Bell Labs) أول خلية شمسية عملية باستخدام السيليكون، بمردود يقدر بحوالي 6%.

3.1. السبعينيات والثمانينيات: بدء الانتشار التجاري

- 1970 تحسينات في مردود الخلايا الشمسية : بدأت الأبحاث في تحسين مردود خلايا السيليكون، ونجحت في رفع كفاءتها إلى حوالي 15%.
- 1973 أزمة النفط : أدت أزمة النفط إلى زيادة الاهتمام بالطاقة الشمسية كمصدر بديل للطاقة.
- 1980 استخدام الخلايا الشمسية في التطبيقات الفضائية : أصبحت الخلايا الشمسية عنصراً أساسياً في تشغيل الأقمار الصناعية ومركبات الفضاء.

4.1. التطور في التسعينيات وبداية القرن الحادي والعشرين

- 1990 ظهرت تقنيات جديدة : ظهرت تقنيات مثل الخلايا الشمسية ذات الطبقات الرقيقة (Thin Film)، والتي تستخدم مواد أقل تكلفة مثل الكادميوم تيلورايد (CdTe) والسيلينيوم الكوبالت (CIGS).
- 2000 تطورات في تصنيع الخلايا : تحسنت عمليات التصنيع مما أدى إلى انخفاض ملحوظ في تكلفة إنتاج الخلايا الشمسية.

5.1. العقد الأخير: التركيز على الكفاءة والتكلفة

- 2010 تزايد الاعتماد على الطاقة الشمسية : بدأت الطاقة الشمسية تنافس مصادر الطاقة التقليدية في بعض المناطق من حيث التكلفة.
- 2012 مردود الخلايا متعددة الوصلات : وصلت كفاءة الخلايا الشمسية متعددة الوصلات (Multi-junction) إلى أكثر من 40%.
- 2020 تقنيات جديدة مثل خلايا البيروفسكايت : ظهرت مواد جديدة مثل البيروفسكايت (Perovskite) التي تبشر بمستقبل مشرق بفضل كفاءتها العالية وتكلفتها المنخفضة نسبيًا.

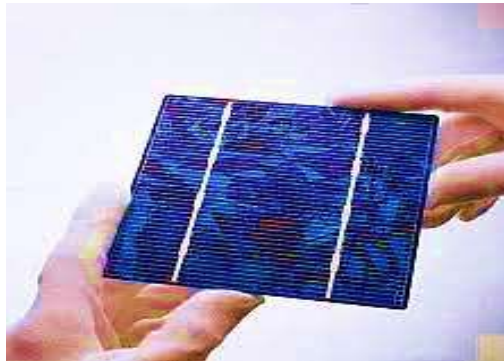
6.1. نحو خلايا أكثر كفاءة واستدامة

- تطوير خلايا شمسية هجينة : يجري البحث في دمج تقنيات مثل خلايا السيليكون مع البيروفسكايت لتحقيق مردودات أعلى.
- التركيز على الاستدامة : يتم تحسين تقنيات التصنيع لجعلها أكثر استدامة وأقل تأثيرًا على البيئة، مثل تقليل استخدام المواد السامة وإعادة تدوير المكونات.
- تطور الخلايا الشمسية كان مدفوعًا بالتقدم في العلم والتكنولوجيا، بالإضافة إلى الحاجة المتزايدة لمصادر الطاقة النظيفة والمتجددة. مع استمرار الابتكار، يُتوقع أن تصبح الخلايا الشمسية أكثر كفاءة وأقل تكلفة، مما يساهم في انتشارها على نطاق أوسع عالميًا.

2. مردود الخلايا الشمسية

الأجيال الثلاثة للخلايا الشمسية هي:

1.2. الجيل الأول: السيليكون البلوري (انظر الشكل 1)



الشكل 1: الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري

خلايا الجيل الأول، والتي تُسمى أيضًا الخلايا الكلاسيكية أو التقليدية أو خلايا "الرقاقة"، مصنوعة من السيليكون البلوري، وتصنّف إلى مجموعتين: أحادية البلورة، ومتعددة البلورات، وفقًا لبنيتها البلورية.



خلية أحادية البلورية

خلية متعددة البلورات

الشكل 2: الخلايا الشمسية متعددة البلورات وأحادية البلورات

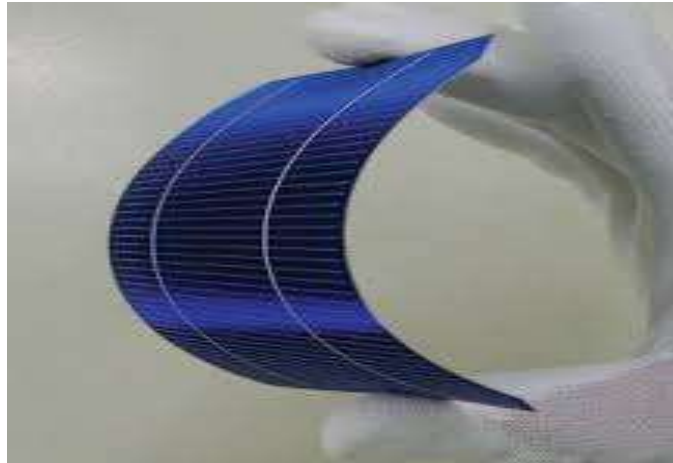
تحتوي الألواح الشمسية أحادية البلورية على خلايا مقطوعة من قطعة من السيليكون وبلورة واحدة. يتم ملائمة بذرة بلورية واحدة ذات اتجاه بلوري معروف مع السيليكون السائل عند درجة حرارة تبلغ حوالي 1400 درجة مئوية، ثم يتم سحبها تدريجيًا إلى الأعلى [1] [4]، بحيث:

- سرعة التمدد: 1 ملم/ثانية،
- سرعة الدوران: 30 دورة في الدقيقة.

يتم بعد ذلك احتجاز السيليكون السائل، ثم يبرد بسرعة ويتصلب، مع اعتماد الاتجاه البلوري للسلائف. يُعرف هذا باسم طريقة تشوخرالسكي (Czochralski method).

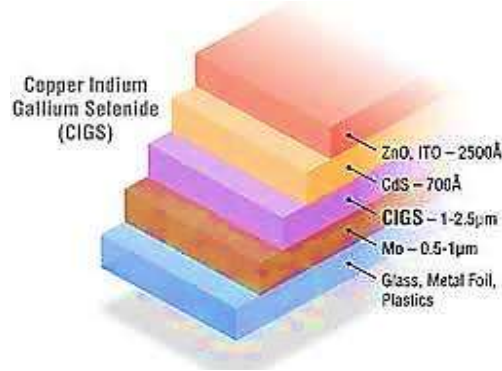
تتكون الخلايا الشمسية متعددة البلورات من عدة بلورات موجهة في اتجاهات مختلفة. يوضع السيليكون السائل في بوتقة من الجرافيت، ثم يُبرّد من الأسفل لعدة عشرات من الساعات. تتمتع الخلايا البلورية المتوفرة حاليًا في السوق بكفاءات تبلغ حوالي 21-23%. لكن في بعض المخابر، تم الوصول إلى كفاءة بلغت 25.6%.

2.2. الجيل الثاني: طبقات رقيقة (انظر الشكل 3)



الشكل 3: الخلايا الشمسية ذات الطبقات الرقيقة

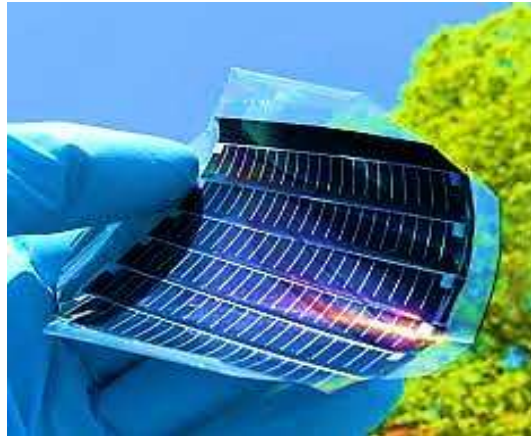
يشتمل الجيل الثاني (انظر الشكل 4) على خلايا شمسية رقيقة، مثل السيليكون غير المتبلور، وخلايا CdTe (كادميوم تيلورايد)، وخلايا CIGS (النحاس والإنديوم والجالسيوم والسيلينيوم).



الشكل 4: الخلايا الشمسية السليكونية غير المتبلورة وCIGS

في حين أن خلايا السيليكون تبلغ سماكتها حوالي 200 ميكرومتر، فإن الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة تكون سماكتها أقل من 10 ميكرومتر.

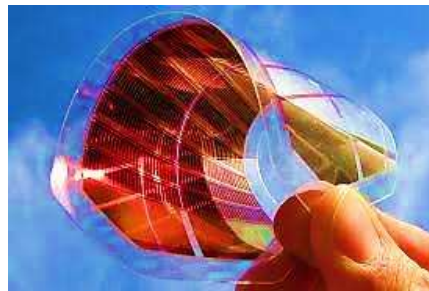
في المختبر، حققت خلايا CIGS وCdTe مردودًا بنسبة 18%، بينما وصل السيليكون غير المتبلور إلى 13% فقط. تُستخدم تقنية CdTe (انظر الشكل 5) في محطة "مزرعة توباز للطاقة الشمسية" في كاليفورنيا، وهي ثامن أكبر محطة للطاقة الكهروضوئية في العالم (2018).



الشكل 5: مردود الخلايا الشمسية CIGS وCdTe

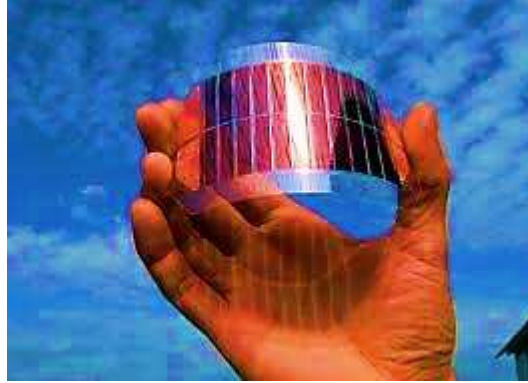
ومع ذلك، تشكل خلايا CdTe تحديًا عندما تصل إلى نهاية عمرها، نظرًا لمحتواها من الكاديوم، الذي يمثل خطرًا بيئيًا. إن 4% من الإنتاج العالمي للخلايا الشمسية مخصص لتكنولوجيا الأغشية الرقيقة، بينما تهيمن خلايا السيليكون الشمسية البلورية على السوق بنسبة 90%.

3.2. الجيل الثالث: الطاقة الشمسية الناشئة (انظر الشكل 6)



الشكل 6: الخلايا الشمسية ذات الطبقات الرقيقة

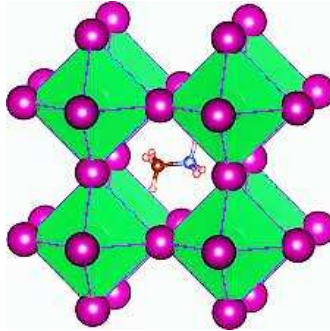
يتراوح المردود عبر الأجيال الثلاثة بين 10% و46%. يتضمن الجيل الثالث (انظر الشكل 7) من الخلايا الشمسية عددًا من تقنيات الأغشية الرقيقة تُسمى الخلايا الكهروضوئية الناشئة. لم يُستخدم معظمها تجاريًا بعد، ولا تزال في مرحلة التطوير.



الشكل 7: الخلايا الشمسية من الجيل الثالث

يمكن لتقنيات الأغشية الرقيقة الناشئة أن تصل سماكتها إلى 0.6 ميكرومتر. يستخدم معظمها مواد عضوية، وغالبًا ما تكون مركبات معدنية عضوية، بالإضافة إلى مواد غير عضوية. وتُصنع باستخدام طرق غير مكلفة. على سبيل المثال، يمكن ترسيب الحبر الكهروضوئي على الفيلم باستخدام طابعة نافثة للحبر، أو يمكن رش الصبغة الكهروضوئية على ركيزة زجاجية. وتتطلب هذه التكنولوجيا استثمارات أقل بـ 10 إلى 20 مرة من تلك المطلوبة لإنتاج ألواح السيليكون. تبلغ كفاءة هذه الأنواع من الخلايا الشمسية اليوم حوالي 10%.

تعتبر خلايا البيروفسكايت (Perovskite) إحدى التقنيات الواعدة، حيث تُستخدم فيها مواد غير مكلفة. تشمل الخلية الكهروضوئية من نوع البيروفسكايت (انظر الشكل 8) على عنصر كيميائي له بنية البيروفسكايت، وغالبًا ما يكون هجينًا عضويًا وغير عضوي من الرصاص أو هاليد القصدير.



الشكل 8: التركيب البلوري للبيروفسكايت (Perovskite)

فيما يلي مثال على البنية البلورية للبيروفسكايت ذات الخصائص الكهروضوئية $\text{CH}_3\text{NH}_3 \text{PbX}_3$ [x=I, Br] و/أو Cl، كاتيون ميثيل الأمونيوم ($+\text{CH}_3\text{NH}_3$) محاط بمجسم ثماني السطوح PbCl_6 . تحسنت كفاءة خلية البيروفسكايت الشمسية تحت ظروف المختبر بشكل كبير، من 14% إلى 22%. ويعمل الباحثون حاليًا على إزالة الرصاص من خلايا البيروفسكايت الشمسية، نظرًا لما يشكله من خطر بيئي. وفقًا لمعهد فراونهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE)، من المتوقع أن تفقد تقنيات الجيل الأول من الطاقة الكهروضوئية بشكل جماعي، 47% من حصتها السوقية الحالية على مدار الخمسة عشر عامًا القادمة، ليتم استبدالها بتقنيات الجيلين الثاني والثالث.

3. الحد النظري لمردود الخلايا الشمسية

هل هناك حدّ نظري لمردود الخلايا الشمسية؟ ما هو هذا الحدّ؟ وما هو أقصى مردود يمكن تحقيقه باستخدام خلية شمسية تحتوي على وصلة PN واحدة؟

في عام 1963، قام الفيزيائيان، الأمريكي ويليام شوكلي (William Shockley) والألماني هانز-جواشيم كويسر (Hans-Joachim Queisser)، بحساب هذا الحد بناءً على القانون الثاني للديناميكا الحرارية، الذي ينص على أن حدّ مردود "الألات الحرارية" هو دالة لدرجة حرارة المصدر الساخن (الشمس) والمصدر البارد (الخلية)، وذلك وفقاً للفرضيات التالية:

- الخلية لا تستخدم كامل طيف المستحلب الشمسي، حيث يتم فقدان جزء من الإشعاع بشكل منهجي نتيجة تحوله إلى حرارة.
- ضوء الشمس لا يتركز بالمرآيا أو العدسات.
- يعمل الباحثون على عدة حلول للتغلب على حد شوكلي - كويسر (Shockley-Queisser limit)، منها:
- 1- الخلايا متعددة الوصلات: تحقق مردوداً يبلغ 40% في المختبر.
- 2- خلايا تركيز متعددة الوصلات: تحقق مردوداً يبلغ 40% في المختبر.
- 3- ثلاث نقاط كمومية: حد مردود 60%. تم تحقيق 10% في المختبر.
- واليوم، بدأت هذه الحلول تؤتي ثمارها بالفعل في المختبر، حيث وصلت الكفاءة إلى ما بين 25% و46%.

4. الانتقال من الخلايا الشمسية إلى الأنظمة الكهروضوئية

يُمثل الانتقال من الخلايا الشمسية إلى الأنظمة الكهروضوئية تطوراً كبيراً في كيفية استخدام الطاقة الشمسية بشكل عملي وفعال على نطاق واسع. فالأنظمة الكهروضوئية تُعدّ حلولاً متكاملة تتجاوز الخلايا الشمسية الفردية، حيث تشمل مكونات أخرى تدعم توليد الكهرباء وتوزيعها واستخدامها. فيما يلي أبرز ملامح هذا التطور:

1.4. الخلايا الشمسية: المكوّن الأساسي

- **التعريف:** الخلية الشمسية هي جهاز يحوّل ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء باستخدام التأثير الكهروضوئي. وتتكون عادة من مواد شبه موصلة، مثل السيليكون.
- **الوظيفة:** تنتج كل خلية شمسية تياراً كهربائياً مستمراً (DC) عند تعرضها لضوء الشمس، وتبلغ كفاءتها الفردية غالباً ما بين 15% و25%.

2.4. الوحدات الشمسية

- **التعريف:** يتم تجميع عدد من الخلايا الشمسية في وحدات (ألواح) شمسية لزيادة كمية الطاقة المنتجة.
- **التطوير:** تأتي الألواح الشمسية بأحجام وأشكال مختلفة، مع تحسينات في المواد المستخدمة، مثل الزجاج المغلف والمواد المقاومة للتغيرات البيئية.

3.4. الأنظمة الكهروضوئية: الحل الشامل

- **التعريف:** النظام الكهروضوئي هو مجموعة متكاملة من المكونات التي تعمل معاً لتوليد الكهرباء من ضوء الشمس واستخدامها بكفاءة. يتضمن النظام عادةً ما يلي:
- **الألواح الشمسية:** تلتقط ضوء الشمس وتحوّلها إلى كهرباء.
- **العاكس (Inverter):** يحوّل التيار المستمر (DC) الناتج عن الألواح إلى تيار متردد (AC) الذي يمكن استخدامه في المنازل والشبكات الكهربائية.

- أجهزة التحكم بالشحن: تُستخدم في الأنظمة التي تحتوي على بطاريات لتجنب الشحن الزائد أو التفريغ العميق للبطاريات.
- البطاريات: تخزين الكهرباء للاستخدام لاحقاً، خصوصاً في الأنظمة المستقلة عن الشبكة.
- هيكل التثبيت: يضمن تثبيت الألواح في الزاوية والاتجاه الأمثل لالتقاط أكبر قدر من ضوء الشمس.
- أنظمة التوصيل والأسلاك: تربط جميع المكونات معاً لضمان تدفق الكهرباء بأمان وكفاءة.

5. أنواع الأنظمة الكهروضوئية

1.5. الأنظمة المتصلة بالشبكة (Grid-tied)

تستخدم هذه الأنظمة العاكسات لحقن الكهرباء المولدة في الشبكة العامة. أي كهرباء زائدة يتم توليدها يمكن بيعها إلى مزودي الطاقة أو استخدامها لاحقاً.

2.5. الأنظمة المستقلة (Off-grid)

تُستخدم في المناطق النائية، حيث يتم تخزين الكهرباء في بطاريات لاستخدامها عند الحاجة.

3.5. الأنظمة الهجينة (Hybrid)

تجمع بين النظامين، حيث يمكنها العمل بشكل مستقل أو بالتوازي مع الشبكة العامة.

6. التطبيقات والمزايا

1.6. التطبيقات المنزلية

تُستخدم الأنظمة الكهروضوئية لتزويد المنازل بالطاقة، مما يُقلل من فواتير الكهرباء ويزيد من الاعتماد على مصادر الطاقة النظيفة.

2.6. التطبيقات الصناعية والتجارية

تُستخدم في المباني التجارية والصناعية الكبيرة لتوفير الطاقة وتقليل التكاليف التشغيلية.

3.6. التطبيقات الزراعية

تُستخدم لتشغيل مضخات المياه، والإنارة، وأنظمة الري في المناطق الريفية.

4.6. الاستدامة

توفر الطاقة الشمسية مصدراً نظيفاً ومتجدداً يُقلل من انبعاثات الكربون.

5.6. الجدوى الاقتصادية

أصبحت تكلفة الكهرباء المنتجة من الأنظمة الكهروضوئية تنافسية مع مصادر الطاقة التقليدية.

6.6. المرونة

يمكن تثبيت الأنظمة الكهروضوئية على أسطح المنازل، الأراضي المفتوحة، وحتى على سطح الماء.

7. تحديات الأنظمة الكهروضوئية

- التكلفة الأولية: على الرغم من انخفاض التكاليف على مر السنين، فإن تكلفة التركيب الأولية لا تزال مرتفعة.
- التخزين: أنظمة تخزين الطاقة مثل البطاريات لا تزال مكلفة وتحتاج إلى تحسينات في الكفاءة والسعة.
- الكفاءة: تحسين كفاءة الألواح الشمسية لا يزال هدفاً مستمراً، حيث يؤثر على مقدار الطاقة التي يمكن توليدها ضمن مساحة معينة.

8. التطورات المستقبلية

- تكامل الشبكات الذكية: تحسين إدارة تدفق الطاقة بين المنازل والشبكات لتحسين الكفاءة العامة.
- التقنيات الناشئة: تطورات في تقنيات مثل الخلايا الشمسية ذات الطبقات الرقيقة والبيروفسكايت لتحسين المردود وخفض التكاليف [3]، [6].
- أنظمة التخزين المتقدمة: تطوير بطاريات أكثر كفاءة وأطول عمراً، مما يعزز موثوقية الأنظمة المستقلة.

الخاتمة

الانتقال من الخلايا الشمسية الفردية إلى الأنظمة الكهروضوئية يعكس تحولاً كبيراً في كيفية استخدام الطاقة الشمسية لتلبية الاحتياجات المتزايدة للطاقة النظيفة والمتجددة. مع التطورات التكنولوجية المستمرة، من المتوقع أن تصبح الأنظمة الكهروضوئية أكثر كفاءة وأقل تكلفة، مما يعزز انتشارها ويسهم في تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية.

المراجع

- [1] P. Gillespie, Solar Energy Jobs Double in 5 Years, CNN Money Cable News Network, January 12, 2016.
- [2] R. Messenger and A. Abtahi, Photovoltaic Systems Engineering, Taylor & Francis, 2017.
- [3] National Renewable Energy Laboratory (NREL) www.nrel.gov.
- [4] L. Sherwood, U.S. Solar Market Trends 2013, Interstate Renewable Energy Council, July 2014.
- [5] A. Smets et al., Solar Energy : The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems, UIT Cambridge Ltd, 2016.
- [6] Solar Energy International (SEI) www.solarenergy.org.

